

---

# 파이프라인 유체시스템 분석을 위한 새로운 유한체적법

## A new FVM-based analysis on pipeline fluid system

홍석우\*, 민대호, 홍우람, 김종암(서울대학교)

---

### 1. 서 론

파이프라인 유체시스템에 대한 수치해석 기법과 공학적 응용문제들이 토목, 건축, 기계, 자동차, 항공 등 산업체의 광범위한 분야에서 다루어져 왔다. 유체시스템의 가장 기본적인 구성요소는 다수의 파이프 관 요소(Pipe element)와 이들을 연결하는 접속부(Junction)이다. 또한 시스템을 구동 및 제어하기 위해 팬, 펌프 등의 유체기계와 밸브, 댐퍼 등의 개폐장치가 필요하며, 작동유체가 액체상 또는 다상인 경우 어레스터(Arrestor), 체크밸브 등과 같이 시스템을 급속 압력변동으로부터 보호하는 안전장치가 요구된다. 그 밖에 시스템의 설계 목적에 따라 열교환기, 연소기 등의 추가적인 설비가 장착되기도 한다.

유체시스템에 대한 이론적인 해석의 주된 관심사는 두 가지로 분류해 볼 수 있으며, 첫째 목적은 정상 운전 모드에서의 설계 유량, 압력 등 시스템의 성능이 설계조건을 만족하는 지 여부를 예측하는 시스템 성능 분석에 있다. 두 번째 목적은 밸브의 급속 개폐, 펌프 트립 등 설비의 부주의한 운전 및 사고로 인하여 수충격(Water hammering)과 같은 유체의 급속 변동 현상이 발생하곤 하는데, 이는 과도한 압력파를 동반하므로 시스템에 충격을 주어 피로와 파괴의 원인이 된다. 따라서, 유체시스템의 성능 분석을 비롯하여 안전성 확보를 위해서는 파이프라인 내 유체의 정상상태 뿐 아니라 동특성에 대한 이론적인 해석이 필수적이며, 이를 이용한 설계안에 대한 평가와 운전 매뉴얼 작성 등이 요구되고 있다.

본 연구에서는 파이프라인 유체시스템의 기본

구성요소인 파이프 관 요소와 접속부에 대한 새로운 유한체적법 해석 모델로 Hong과 Kim[1,2]이 제안한 GJM(Ghost Junction Method)을 소개하고자 한다. 또한, 작동유체가 액체상 또는 다상 유동인 경우 관 내 압력파의 동특성에 대한 해석의 정확성을 향상시키기 위해 유체-구조 상호작용(FSI) 효과를 모델링하여 유한체적법에 적합하게 고안하여 제안하였으며 다상유동 해석이 가능하도록 확장하였다.

### 2. 해석 모델(Ghost Junction Method)

#### 2.1 접속부와 관 요소의 해석 모델

Fig. 1에 나타난 것처럼 접속부에 가상의 제어체적을 자동생성 할 수 있으며, 이 때 생성된 제어체적은 하나의 Ghost Junction Cell과 동일하며 접속부에 대한 지배방정식은 다음과 같이 유한체적법으로 표현할 수 있다.

$$V \frac{\partial Q}{\partial t} = - \sum_i F_i s_i - \frac{\partial V}{\partial t} Q \quad (1)$$

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e_t \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} \rho U \\ \rho u U + n_x p \\ \rho v U + n_y p \\ \rho w U + n_z p \\ (\rho e_t + p) U \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$U = n_x u + n_y v + n_z w, N = (n_x, n_y, n_z) \quad (3)$$

$$p = (\gamma - 1) \rho e - \gamma p_c, a = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho} (p + p_c)} \quad (4)$$

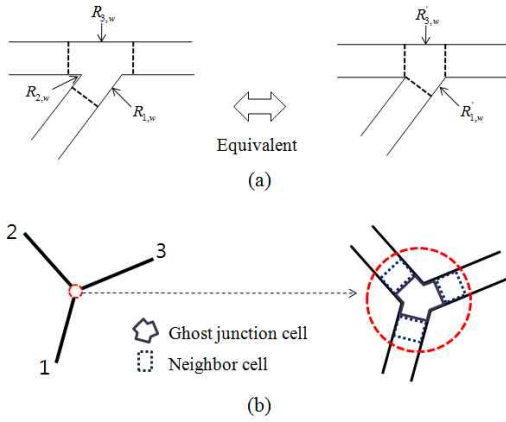


Fig. 1 Imaginary ghost junction cell

여기서  $U$ ,  $N$  은 인터페이스(접속부와 관 요소를 연결하는 경계면)에 대하여 수직인 속도와 단위벡터이다.  $V$  는 가상의 제어체적의 크기로 연결된 관 요소 격자의 평균 체적을 사용하였으며 Fig. 1(b)에 나타내었다. 또한, 접속부에 생성된 Ghost Junction Cell은 이웃한 관 요소와의 인터페이스 외에 벽면으로 구성되어 있으므로 접속부에서의 운동량 교환을 올바르게 해석하기 위해서는 다음과 같이 벽면효과를 고려해야 한다. 벽면효과는 운동량 방정식에 다음의 힘벡터(Force Vector)로 표현된다. 여기서 하첨자  $R$  은 유효벽면을 나타낸다.

$$\overline{R_w} = \sum_i R_{i,w} = p s_R (n_x, n_y, n_z)_R \quad (5)$$

관 요소(Pipe element) 유동은 1차원의 특성을 갖고 있으므로 이에 대한 1차원 Euler 방정식은 다음과 같다.

$$V \frac{\partial Q}{\partial t} = - \left( s_{j+\frac{1}{2}} F_{j+\frac{1}{2}} - s_{j-\frac{1}{2}} F_{j-\frac{1}{2}} \right) + H_V = -R \quad (6)$$

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho U \\ \rho e_t \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} \rho U \\ \rho U^2 + p \\ (\rho e_t + p) U \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서,  $\rho$ ,  $U$ ,  $p$ ,  $e_t$ ,  $s$ ,  $V$  은 각각 밀도, 속도, 압력, 토탈 에너지, 파이프 단면적, 격자체적의

크기를 나타낸다. 주 소스벡터는 압력, 벽면마찰, 그리고 중력에 의한 힘으로 구성되며 다음과 같다.

$$H_V = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_w \text{Pr} \Delta x + p \left( s_{j+\frac{1}{2}} - s_{j-\frac{1}{2}} \right) + m g_n \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서  $\tau_w$  은 벽면 전단응력을 나타내며,  $\text{Pr}$ ,  $\Delta x$ ,  $g_n$ ,  $m$  은 단면 접속길이, 격자크기, 중력가속도, 제어체적 내 유체의 질량을 나타낸다. 이 밖의 물리현상에 대한 모델링을 추가해야 하는 경우 보조 소스벡터를 추가할 수 있으나, 본 연구에서는 생략하였다.

## 2.2 접속부 인터페이스 처리

운동량 상호작용을 고려해야 하는 Junction에서 데카르트좌표계를 사용하며, 분기관은 1차원 국부좌표계를 사용한다. 접속부 인터페이스에서의 플럭스는 데카르트좌표계에서의 표현으로 얻을 수 있으며, 동일시간 단계에 이웃 분기관의 경계조건으로 사용된다. 이 때, 인터페이스에서 물성치 보존을 위해 식(9)의 오른쪽 식에 의해 1차원 국부좌표계로 변환하여 사용한다.

$$F_{3d} = \begin{pmatrix} f_{3d}^\rho \\ f_{3d}^{\rho u} \\ f_{3d}^{\rho v} \\ f_{3d}^{\rho w} \\ f_{3d}^{\rho e_t} \end{pmatrix}, F_{1d} = \begin{pmatrix} f_{3d}^\rho \\ n_x f_{3d}^{\rho u} + n_y f_{3d}^{\rho v} + n_z f_{3d}^{\rho w} \\ f_{3d}^{\rho e_t} \end{pmatrix} \quad (9)$$

식(9)는 수치플럭스의 보존법칙을 보장하나 물리적으로 정확한 해를 보장하지는 않는다. 따라서, 접속부에서 운동량 교환에 의한 이론적인 손실계수를 예측하기 위해서는 인터페이스에서의 수치플럭스를 스케일링 함수로 보정하는 작업이 필요하다. 이를 설명하기 위해 다음과 같은 분석을 수행하였고 스케일링 함수의 효과를 살펴보았다. 자세한 내용은 Hong과 Kim[1,2]의 연구결과에 소개되어 있으므로 본 논문에서는 생략하였다. 인터페이스에서의 압력변화량을 이론적으로 분석하기 위해 질량보존 방정식과 운동량 방정식으로부터 인터페이스에 수직인 속

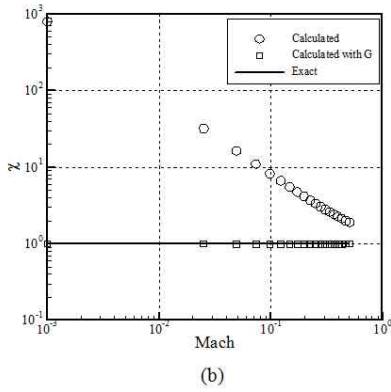
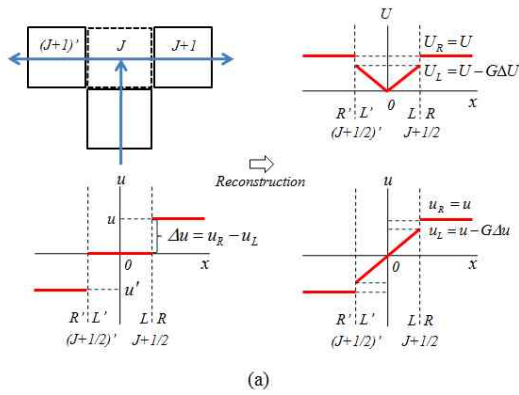


Fig. 2 (a)Reconstruction, (b)The Effect of Scaling Function

도성분에 의한 변화량과 수평성분에 의한 변화량으로 분리하여 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta p = -\rho a \Delta U_n - \rho a \left( \frac{M + |M|}{1 + M} \right) \left( \frac{t_x + t_y}{n_x + n_y} \right) \Delta U_t \quad (10)$$

여기서,  $M = U_n/a$ . 식 (10)의 우변의 첫 번째 항은 인터페이스에 수직인 속도성분의 차에 의한 것이며 식 (11)로 정의되는 Joukowsky의 Water-hammer 방정식과 같음을 알 수 있다.

$$\Delta p = -\rho a \Delta U \quad (11)$$

그런데 우변 첫 번째 항은 인터페이스에서 비물리적인 해를 유도하는 수치오차로 작용할 수 있다. 예를 들면, Fig. 2(a)에서 90° Counter-Dividing Configuration

을 생각해보자. 접속부에서 x방향 속도성분  $u$ 의 셀 평균값은 0이 되지만, 인접한 이웃 셀에서는 유한 값을 갖는다. 따라서, 우변 첫 번째 항은 수충격의 충격과 크기와 같은 값을 갖게 된다. 이와같이 인터페이스에서 발생하는 비물리적 현상은 Godunov 계열의 유한체적 수치기법을 사용하면서 격자 해상도가 부족한 경우에 발생하게 됨을 알 수 있다. 따라서, 새로이 제안한 해석모델의 수치적인 문제는 접속부에 가상의 셀 1개만을 사용한다는 것이며 Hong과 Kim[1,2]은 이러한 수치적 문제를 해결하기 위한 적절한 치료법으로 다음과 같은 스케일링 함수를 제안하였다.

$$G = \delta \cdot \min \left( \frac{|\Delta U_n|}{a}, 1 \right), \quad \delta = \begin{cases} 1 & \text{if outflow} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

식 (12)의 스케일링 함수를 식 (10)의 우변 첫 번째 항에 적용하면 다음과 같이 정리된다. 수식의 간략화를 위해 2차원 좌표계를 사용하였다.

$$\Delta p + \rho |\Delta U_n| \Delta U_n = -\rho a \left( \frac{M + |M|}{1 + M} \right) \left( \frac{t_x + t_y}{n_x + n_y} \right) \Delta U_t \quad (13)$$

식 (13)의 좌변은 운동량 플럭스의 변화량과 유사하므로 스케일링 함수를 적용한 GJM이 접속부에서 이론해를 예측할 수 있도록 도움을 준다. 한 편 스케일링 함수를 수치플럭스에 반영하기 위하여 Fig.2에 나타낸 것처럼 간단한 투영법을 적용하였다. Interface의 왼쪽 (Junction 방향)으로 투영된 속도벡터는 스케일링한 수직 속도벡터와 본래 평행한 속도벡터의 합으로 얻을 수 있고, 오른쪽(Branch 방향)은 그대로 사용한다.

Fig. 2(b)는 90° Counter-Dividing에 대한 유선(3,1)에서 토탈압력의 강하량을 식(14)와 같이 이론값으로 무차원화 한 값을 보여준다. 스케일링 함수를 사용하지 않은 경우,  $M = 0.01$ 일 때 이론값보다 80배 이상 크다는 것을 알 수 있다. 비슷한 현상이 90° Counter-Combining에서도 나타날 것이다. 반면, 스케일링 함수를 사용한 경우 이론값을 모사함을 알 수 있다.

$$\chi = \frac{K_{(3,1)}}{K''_{(3,1)}} = \frac{\Delta p_{0,(3,1)}}{\Delta p''_{0,(3,1)}} \quad (14)$$

여기서, 위첨자 "은 각각 이론값을 의미한다.  $(i,j)$ 는

파이프  $i$  와 파이프  $j$  간 유선을 나타낸다.

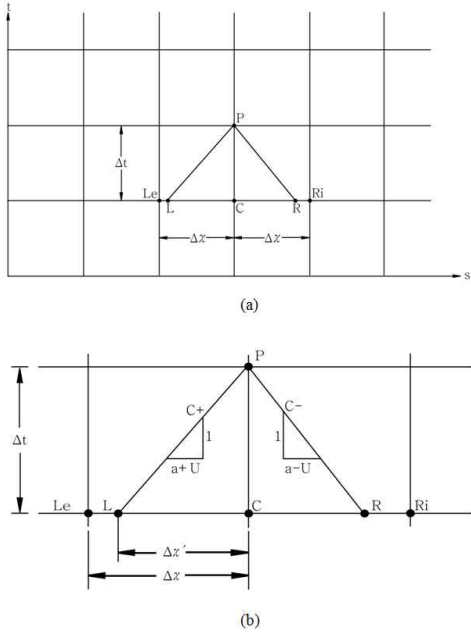


Fig. 3 (a)Space-time domain, (b)Interpolation

### 3. 해석 모델의 성능

새로운 유한체적법 기반의 해석모델인 GJM이 접속부와 분기관을 임의의 조합에 대하여 정상상태(평형상태)에서 이론해를 모사할 수 있음을 Hong과 Kim[1,2]이 증명하였으므로 본 연구에서는 유체시스템 내 충격파의 분할(Split), 반사(Reflection), 관통(Transmission), 그리고 중첩(Superposition)에 대한 해석 능력을 소개하고자 한다. 객관적인 성능의 평가를 위해 전통적인 해석모델인 MOC와 비교하였으며, 또한 상용S/W인 Fluent 6.3의 결과와 비교하였다.

#### 3.1 전통적인 해석 모델 소개

MOC는 지배방정식에서 대류 항을 제거하고 등엔트로피 조건을 가정하여 유동의 지배방정식을 상미분 연립방정식 형태로 단순화 하여 표현하는 수치기법이며 이산화를 거치면 식(15)와 같이 연립방정식 형태로 정리된다. 또한, 접속부에 대한 전통적인 해석모델은 절점기반의 결합조건으로부터 연결된 분기관들에 대한 경계조건을 획득하여 각 관 요소를 해석하는 방식이며

본 연구에서는 소개를 생략하였다.

$$\begin{aligned} C+: \frac{U_P - U_L}{\Delta t} + \frac{g}{a} \frac{H_P - H_L}{\Delta t} + \frac{f}{2D_H} U|U| &= 0 \\ C-: \frac{U_P - U_R}{\Delta t} - \frac{g}{a} \frac{H_P - H_R}{\Delta t} + \frac{f}{2D_H} U|U| &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

위의 연립방정식으로부터 시간 적분을 하면 결국 다음의 해를 얻게 된다.

$$\begin{aligned} U_P &= \frac{1}{2} \left[ (U_L + U_R) + \frac{g}{a} (H_L - H_R) \right] \\ &\quad - \frac{f \Delta t}{4D_H} (U_L |U_L| + U_R |U_R|) \\ H_P &= \frac{1}{2} \left[ \frac{a}{g} (U_L - U_R) + (H_L + H_R) \right] \\ &\quad - \frac{a}{g} \frac{f \Delta t}{4D_H} (U_L |U_L| - U_R |U_R|) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $U_L$ ,  $U_R$ ,  $H_L$ ,  $H_R$  은 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 다음의 space-line interpolation에 의하여 근사적으로 얻는다.

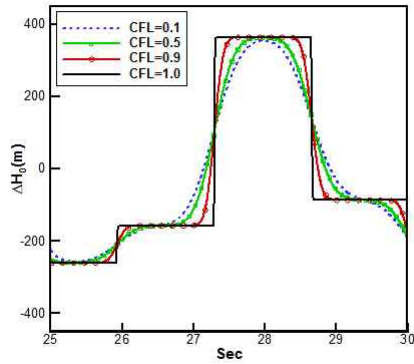
$$\begin{aligned} U_L &= U_C + \frac{\Delta x'}{\Delta x} (U_{\leq} - U_C) \\ \frac{\Delta x'}{\Delta x} &= \frac{\Delta t_{\min}}{\Delta t_{\text{local}}} = \frac{CFL \times \min(\Delta x / |a + U|)}{\Delta x / |a + U|} \end{aligned} \quad (17)$$

#### 3.2 관 내 충격파에 대한 해석 능력 비교

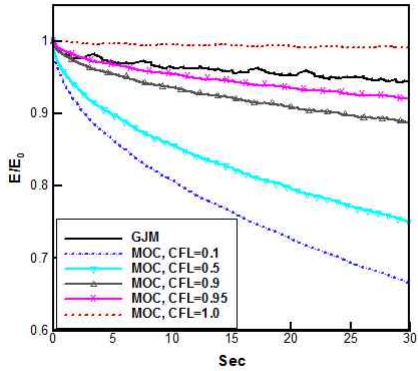
파이프 시스템 내 충격파 발생 시 유체의 급속변동에 대한 해석 능력을 관찰하기 위해 두 개의 파이프가 직렬로 연결된 시스템을 분석 대상으로 선정하였다. 직렬 파이프라인에서 각 파이프 요소의 길이는 1000m, 초기 유속은 1m/s이며 하류 파이프 요소의 단면적이 상류 파이프 요소의 단면적 대비 1/2로 급격히 감소하도록 구성되어 있다. 초기 평형 상태에서 하류 말단 밸브를 급속히 폐쇄하여 수충격을 발생시켰다. 유체의 급속 비정상에 대한 해석 능력만을 객관적으로 비교하기 위해 벽면 마찰계수를 제거하였으며 접속부 손실계수는 GJM이 모사하는 이론값을 MOC에 반영하여 동일한 조건에서 해석 능력을 비교하였다.

우선 Courant number에 대한 민감도 분석을

수행하였고 Fig. 4(b)로부터 Courant number가 1인 이상적인 조건 하에서는 MOC의 수치점성



(a)



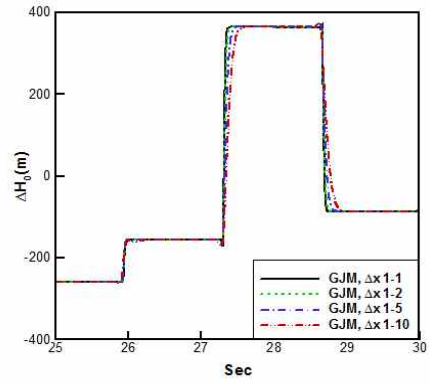
(b)

Fig. 4 Sensitivity to Courant number:  $\Delta x = 5$   
(a) Head trace with MOC (b) Energy trace

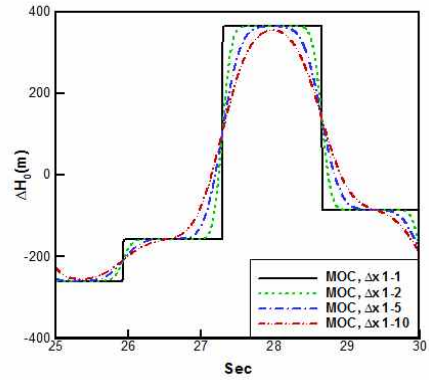
이 가장 작아 정확한 해석 능력을 보여주었으나 0.95인 경우 GJM보다 수치점성이 더 커져 시스템 내 급속변동에 의한 기계적 에너지의 총량이 GJM보다 빠른 속도로 감쇄하고 있다. 더욱이 0.5이하의 Courant number를 사용할 경우 수치점성이 과다하여 Fig. 4(a)에 보인 것처럼 충격파의 구배를 심각한 정도로 훼손하고 있다. 민감도 분석결과는 관내 충격파에 대한 MOC의 정확도를 보장하기 위해 Courant number를 1에 가까운 값을 유지할 수 있어야 하므로 복잡한 시스템을 다루는 데 있어 제약조건으로 작용할 수 있음을 알 수 있다.

다음으로 격자크기의 비균일성에 대한 민감

도 분석을 수행하였다. 상류 파이프 요소의 격자크기는 1로 고정한 채로 하류 파이프 요소의



(a)



(b)

Fig. 5 Sensitivity to irregular grid size:  
(a) Head trace with GJM (b) Head trace with MOC

격자크기를 1~10으로 변화시키면서 수치점성을 비교하였다. Fig. 5에서 GJM은 격자크기의 비균일성에 대해 민감하지 않은 결과를 보여주었으나 MOC는 매우 민감하여 균일한 격자크기를 사용해야 함을 보여주고 있다. 마찬가지로 파이프 요소의 재질의 비균일성에 대한 민감도를 관찰한 결과를 Fig. 6의 (b)에 나타내었으며 기계적 에너지 총량을 추적한 결과 유사한 경향을 보이고 있다. 이와 같이 MOC의 수치점성이 여러 조건들에 민감하게 반응하는 원인은 식 (17)로 표현된 interpolation 기법으로 설명할 수 있다. 식(17)의 두 번째 식에서 정의된 실제 격자 크기에 대한 가상의 격자크기의 비율이 1보

다 작은 경우 수치점성을 발생시키게 된다. 이 비율은 우변의 Courant number에 의존하며 격

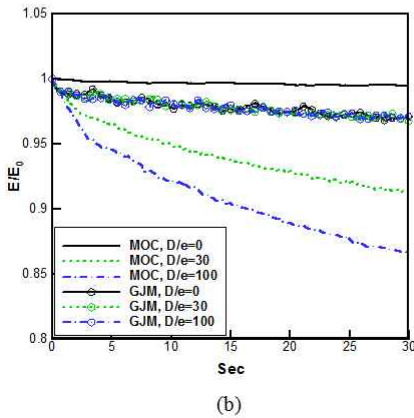
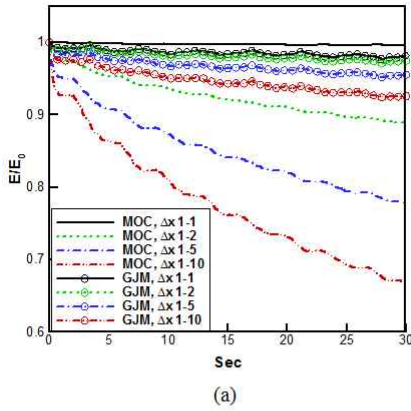


Fig. 6 Comparison of energy trace:  
(a) Irregular grid size (b) Inhomogeneous pipe material

자의 크기, wave speed에 대해서는 최소 값과 지역 값의 비율에 의해 결정되므로 그 균일성에 의존한다고 볼 수 있다. 또한 작동유체가 액체 상인 경우 FSI 효과로 인하여 관 재질과 두께에 따라 wave speed가 변화하게 된다. 따라서, MOC는 관 재질의 균일성에 민감한 결과를 보이게 되는 것이다.

두 번째 검증문제로 T자형 덕트 시스템을 다루었다. 각 덕트의 길이는 340m, 작동유체는 공기, 덕트 1의 초기 유속은 1m/s 이다. 덕트 2와 덕트 3의 경계조건은 토탈 게이지 압력이 0Pa로 고정되었다. 초기 평형상태에서 덕트 1의 상류 밸브를 급속 폐쇄하여 팽창파를 생성시켰다.

생성된 팽창파는 접속부에 도달하여 세 개의 성분으로 분리된다. 1/3은 압축파로 반사되어 덕

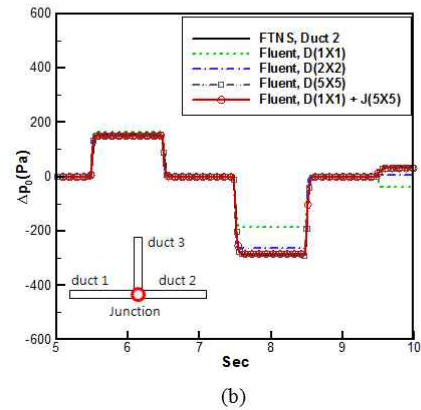
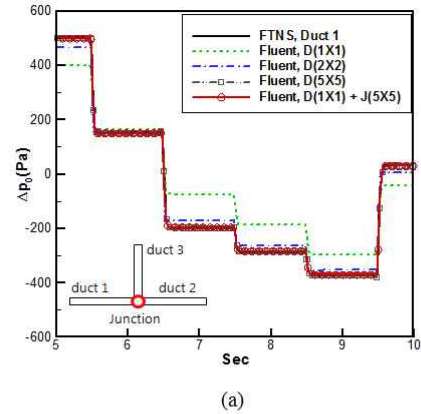


Fig. 7 Wave propagation in T junction:  
(a) At the mid of duct 1 (b) At the mid of duct 2

트 1 상류로 되돌아 오고 나머지 2/3는 덕트 2와 덕트 3의 하류 방향으로 1/3 씩 관통하여 전파하게 된다. 세 개로 분리된 압력파는 시스템을 왕복하면서 분리, 관통, 반사, 중첩을 반복하게 되고 Fig. 7은 덕트 1과 덕트 2의 중간 위치에서 관측된 압력의 변동을 나타낸다.

GJM을 해석 모델로 사용하는 FTNS(Fast Transients and Network Simulator)의 결과와 접속부에 125개의 셀을 사용한 Fluent 6.3의 결과가 비슷함을 알 수 있으며 계산의 효율성을 동일한 조건에서 비교하기 위해 덕트 요소에 대해서는 Fluent를 사용한 경우에도 1차원 계산을 수행하였다. 접속부에서 해상도가 부족한 경우

Fluent 6.3은 정확도가 급격히 저하되었다. 반면에 GJM을 채택한 FTNS는 스케일링 함수를 이용하여 접속부에서 한 개의 셀을 사용하고도 125개의 셀을 사용한 Fluent 보다 더 정확함을 보였다. Table 1에 분석결과를 정리하였으며 계산시간은 FTNS 6초, Fluent 46분으로 약 460배 차이를 보였다.

**Table 1. T자형 덕트시스템 계산 효율성 비교**

	FTNS	Fluent 6.3
Solver type	Density-based coupled	
공간차분	RoeM 2차 정확도	Roe's FDS 2차 정확도
시간적분	4 stage Runge-Kutta	
점성모델	Inviscid	
외부조건	대기압	
EOS	Ideal gas	
CFL	1.0	
덕트요소부 격자 수	340 = (1 X 1) X 340	
접속부 격자 수	1	125 =(5X5)X5
계산방식	Serial	
총 계산횟수	3,415	52,112
계산시간	6 sec	46 min

이상의 민감도 분석과 계산비용의 비교 결과는 산업현장의 응용문제에 대한 GJM의 실용성을 시사하고 있다. 반면 MOC는 수치기법의 단순함으로 쉽게 접근할 수 있는 반면 Courant number, 격자와 파이프 재질의 균일성 등의 제한 조건이 많아 사용자의 주의사항을 요구하고 있다. 이밖에도 기존 연구결과는 단순화 된 지배방정식을 사용하는 MOC의 공학적 응용에 있어 몇 가지 결함에 대해 지적하고 있다. 등엔트로피 조건을 가정하는 MOC는 큰 엔트로피 변화를 동반하는 열전달 문제에 취약하며[3], 대류항을 제거함으로 인하여 관성효과를 무시할 수 없는 고속의 유동 해석에 취약하다[4]. 또한 기존 연구자들은 MOC가 유한체적법과 달리 질량 보존, 에너지 보존을 보장하지 못함을 지적하였고, 외재적 시간적분만을 수행할 수 있으므로 steady 또는 slow transients 현상을 계산하는데

있어 매우 비효율적임을 언급하고 있다[4,5]. 이와는 반대로 GJM은 유한체적법에 기반하여 물리량의 보존법칙을 보장하고 있으며 Euler 방정식을 기본 지배방정식으로 사용하므로 압축성 유동, 열전달 문제에 적용하는데 제한이 없다. 더욱이, 외재적 시간적분과 내재적 시간적분을 모두 사용할 수 있어 광범위한 공학적 응용문제에서 해석의 정확성과 효율성을 유지할 수 있는 장점이 있다.

#### 4. 해석 모델의 확장

작동유체가 액체상 또는 다상혼합 유체인 경우 수충격과 같은 압력 변동에 의해 파이프 요소의 재질에 변형이 유도된다. 유체-구조 상호작용 중 Poisson coupling은 파이프 단면적의 변화를 유도하여 결과적으로 압력파의 크기와 전파 속도를 감소시키게 된다. 기체상이 액체상에 혼합된 경우도 이와 유사한 효과를 야기하므로 시스템의 동특성을 정확히 예측하기 위해 유한체적법에 적합한 형태로 해석 모델을 확장하였다.

##### 4.1 유체-구조 상호작용 효과 모델

고전 수충격 이론에 의하면 FSI에 의해 수정된 wave speed는 다음과 같이 표현된다.

$$a' = \sqrt{\frac{1}{\rho \left[ \frac{1}{K_f} + \frac{1}{s} \frac{\partial s}{\partial p} \right]}} \quad (18)$$

여기서 파이프 단면적의 변화율 항은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{1}{s} \frac{\partial s}{\partial p} = \frac{D_H}{E_m e_m} \phi \quad (19)$$

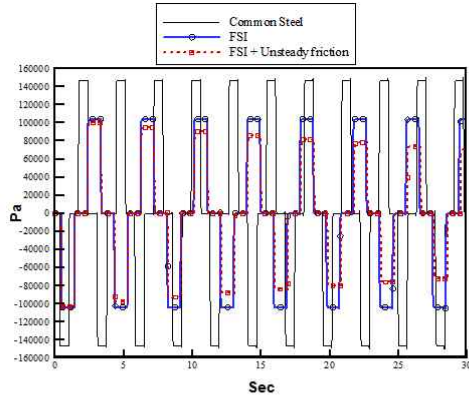
이를 유한체적법의 Source 항으로 모델링하면 다음과 같다.

$$D_{FSI} = - \left( \frac{\rho}{\rho e_v} \right) \times \frac{\partial V}{\partial t} = - \left( \frac{\rho}{\rho e_v} \right) s_0 \Delta x \left( \frac{1}{s_0} \frac{\partial s}{\partial p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} \quad (20)$$

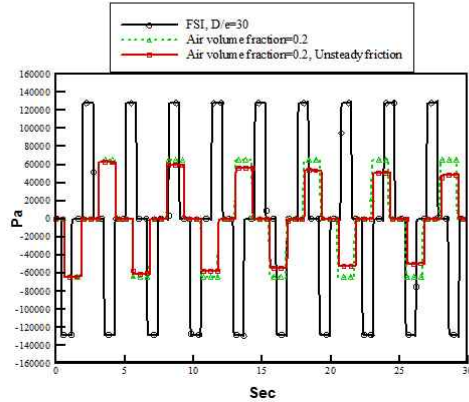
Fig. 8(a)는 식(20)으로 제한한 모델을 반영한



결과 wave speed가 식(18)에 의한 이론 값과 잘 일치하고 있음을 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 8 FSI and air volume fraction effects

#### 4.2 다상유동 해석

수치적 안정성의 향상을 위해 species에 대한 mass fraction 방정식을 이용하는 대신 volume fraction 방정식을 primitive 형태로 다음과 같이 지배방정식에 추가하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho}{\rho e_t} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho U}{(\rho e_t + p) U} \right) = 0 \quad (21)$$

다상 혼합물의 이상기체 상태방정식과 음속은

K. M. Shyue[6]에 의해 다음과 같이 제안되었으며 본 연구에서는 이를 적용하였다.

$$p = (\gamma - 1) \rho e - \gamma p_c \quad a = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho} (p + p_c)} \quad (22)$$

여기서  $\gamma$ ,  $p_c$  는 다음의 식으로부터 얻는다.

$$\frac{1}{\gamma - 1} = \sum_j y^j \left( \frac{1}{\gamma^j - 1} \right), \quad \frac{\gamma p_c}{\gamma - 1} = \sum_j y^j \left( \frac{\gamma^j p_c^j}{\gamma^j - 1} \right) \quad (23)$$

Fig. 8(b)는 물에 공기가 20% 체적으로 혼합된 경우 압력파의 전파속도와 크기가 저감되었음을 나타낸다.

#### 5. 결 론

본 연구에서 소개한 GJM은 유체시스템 내 충격파의 분할, 반사, 관통, 그리고 중첩에 대한 좋은 해석 성능을 보여주었다. 민감도 분석 결과는 전통적인 MOC가 Courant 수, 격자크기의 비 균일성, 그리고 파이프 요소 재료의 비 균일성에 대해 매우 민감하게 수치점성을 발생시키고 있음을 보여주었다. 반면 GJM은 이러한 문제로부터 자유로우므로 산업체의 공학적 응용문제에 다루는데 있어 사용자에게 더욱 편리하며 정확도와 효율성을 겸비하여 전반적인 해석 능력이 MOC 대비 우수한 것으로 보인다. 또한, 유동이 갖는 특성 시간의 크기에 따라 계산의 효율성이 달라지는 MOC와 다르게 내재적/외재적 시간적분을 유동조건에 따라 선택적으로 사용할 수 있도록 개발되었다. 마지막으로 유체-구조 연동 효과의 모델링과 다상 혼합물 유동의 동특성 분석을 위해 수치기법을 성공적으로 확장하였다.

#### 후 기

본 연구는 교육과학기술부의 우주기초원천기술 개발 사업(NSL, National Space Lab, No. 20090091724), 한국연구재단(No.20090084669), 국토해양부 건설기술혁신사업('09 기술혁신 E02), 항공우주신기술연구소 및 BK21 사업의 지원으



로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. W. Hong and C. Kim, A new finite volume method on junction coupling and boundary treatment for flow network system analyses, International Journal for Numerical Methods in Fluids 2009, published online, DOI: 10.1002/fld.2212.
- [2] 홍석우, 김종암, 유동망 시스템 해석을 위한 경계처리에 대한 보존형 유한체적법, 한국전산유체공학회지 2009, 제14권 1호, 35-44.
- [3] G. Q. Zhang and D. N. Assanis, Manifold Gas Dynamics Modeling and Its Coupling With Single-Cylinder Engine Models Using Simulink, J. Eng. Gas Turbines and Power 2003, 125, 563-571.
- [4] G. P. Greyvenstein, An implicit method for the analysis of transient flows in pipe networks, International Journal for Numerical Methods in Engineering 2002, 53, 1127-1143.
- [5] T. Kiuchi, An implicit method for transient gas flows in pipe networks, International Journal of Heat and Fluid Flow 1994, 15, 378-383.
- [6] K. M. Shyue, An Efficient Shock-Capturing Algorithm for Compressible Multicomponent Problems, Journal of Computational Physics 1998, 142, 208-242.